6А

УДК 004.896

А. Апальков[*], Т. Акинфиев[*], М. Армада
Институт промышленной автоматики (IAI CSIC), г. Мадрид, Испания
andrey.apalkov@iai.csic.es

Концепция интеллектуального робота для оценки напряжений в трубопроводах

В статье рассматривается концепция создания интеллектуального робота для исследования напряженного состояния трубных конструкций. Предлагается колесный робот, имеющий разборную жесткую раму. Рассмотрен механизм передвижения робота вдоль трубопровода. Для исследования напряженного состояния трубопровода используется метод вдавливания шарового индентора.

Введение

В последнее время большое внимание уделяется эксплуатации трубопроводов, находящихся под высоким давлением. Это связано прежде всего с безопасностью обслуживающего персонала, населения и окружающей среды. Выход из строя конструкции трубопровода, как правило, происходит вследствие влияния высоких остаточных напряжений (ОН), возникающих при разнообразных механических и тепловых воздействиях (монтаже и изготовлении сварных швов).

В настоящей работе предлагается концепция интеллектуального робота для исследования напряженного состояния трубопроводов. Применение подобного робота в промышленности может существенно повысить безопасность эксплуатации трубопроводов и будет способствовать улучшению состояния окружающей среды в целом. В настоящее время существует множество методик и специальных приспособлений для исследования напряжений на натурных конструкциях, но, как правило, они имеют ряд недостатков. Задача анализа напряженного состояния является одной из наиболее сложных, так как вызывает необходимость анализа физико-механических процессов и структурных преобразований, происходящих в конструкции [1], [2].

Неразрушающие методы анализа напряжений основаны на регистрации изменений физических свойств и характеристик материалов под действием механических напряжений: акустические методы (акустоупругость, метод поверхностных волн Рэлея); рентгеновский метод; метод дифракции нейтронов; магнитострикционный метод; токовихревой метод и ряд других [3]. Среди них наиболее широкое применение на практике нашел рентгеновский метод. Однако данный метод имеет ряд недостатков, наиболее существенными из которых являются малая глубина проникновения рентгеновских лучей в металл (до 0,1 мм), а также сравнительно невысокая точность. До недавнего времени (90-х годов XX столетия) экспериментальные исследования ОН базировались на использовании методов тензометрии [4] и фотоупругих покрытий [5].

Однако в первом из них отсутствует возможность получения поля деформаций, а информация поступает только по усредненным на базе датчика деформациям, что может привести к значительным погрешностям результатов. Второй имеет определённые ограничения, связанные с влиянием внешних факторов.

[*] А. Апальков выражает благодарность Министерству науки и инноваций Испании, а Т. Акинфиев выражает благодарность Высшему совету научных исследований Испании (CSIC) за финансовую поддержку настоящей работы.

Наиболее универсальным и частично-разрушающим экспериментальным методом исследования напряженного состояния конструкций в полевых условиях является метод сверления отверстия-индикатора в его сочетании с таким средством регистрации деформационного отклика, как электоронная цифровая спекл-интерферометрия (ЭЦСИ) [6-8].

Достаточно хорошо известен метод контроля состояния материала и конструкций по вдавливанию шарового индентора с регистрацией двух величин: усилия индентирования и осадки индентора [9]. В настоящее время происходит интенсивное развитие иного подхода, согласно которому деформационный отклик на поверхности исследуемого объекта в зоне индентирования регистрируется в континуальном формате методом ЭЦСИ [10]. Так как такой отклик, в принципе, содержит весьма обширную информацию о состоянии материала в окрестности заданной точки индентирования, то это позволяет ожидать более высокую степень адекватности окончательных результатов испытаний с учетом влияния указанных факторов.

Целью данной работы является разработка концепции интеллектуального робота для исследования напряженного состояния трубных конструкций в натурных условиях. Для регистрации деформационного отклика материала на вдавливание индентора предполагается использование метода ЭЦСИ.

Требования к роботу и элементы его конструкции

В настоящее время разработана концепция интеллектуального робота для исследования напряженного состояния трубных конструкций, которая состоит в следующем:

– робот должен передвигаться вдоль трубопровода и исследовать напряженное состояние в точках, заданных оператором;

– механическое воздействие на материал в исследуемой точке должно быть неразрушающим и производиться методом вдавливания шарового индентора, а деформационный отклик материала на вдавливание индентора необходимо регистрировать в континуальном формате ЭЦСИ.

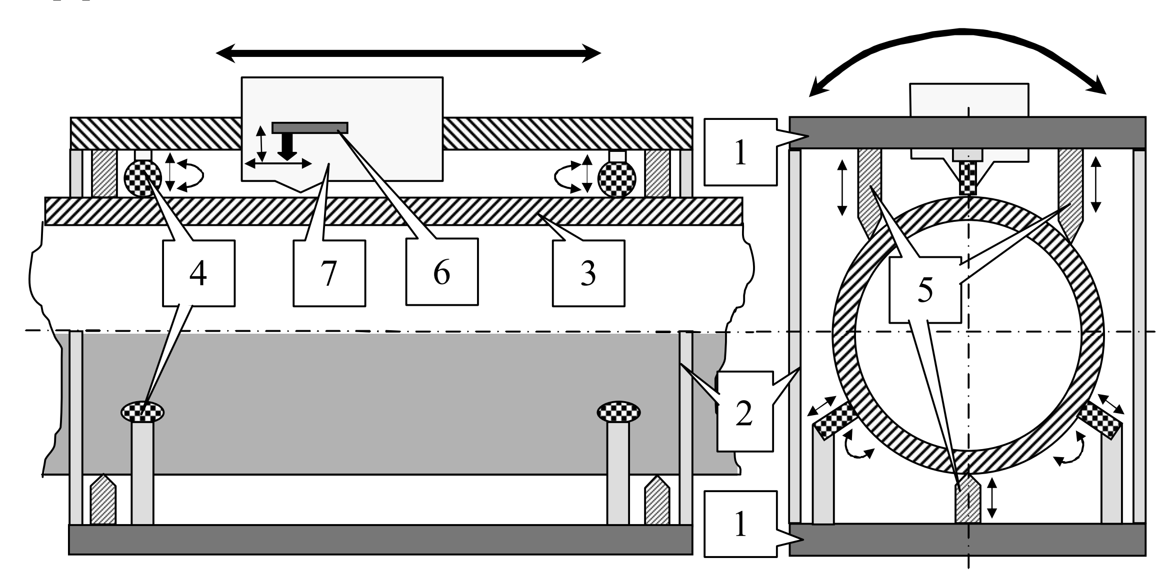


Рисунок 1 – Схема интеллектуального робота для исследования напряженного состояния трубных конструкций:
1 – металлическая плита; 2 – металлические вставки; 3 – трубопровод, 4 – система перемещения; 5 – упоры; 6 – индентор; 7 – ЭЦСИ-интерферометр

Первоначально рама робота, состоящая из 2 металлических плит *1*, скрепленных между собой 4 жесткими металлическими вставками *2* (рис. 1), монтируется на трубопроводе *3*. Транспортировка робота к точке исследования по трубопроводу осуществляется посредством симметрично расположенных шести колес *4*, приводимых в движение электродвигателями. Система крепления колес к раме предусматривает возможность поворота колес, что позволяет роботу передвигаться не только в осевом направлении трубопровода, но также смещаться в окружном направлении. В интересующей точке робот фиксируется упорами *5*. Жесткое закрепление его обеспечивается самотормозящейся передачей винт-гайка.

В точке исследования производится вдавливание индентора *6* и деформационный отклик материала регистрируется спекл-интерферометром *7*.

Ввиду того, что трубопровод в некоторых местах имеет овальность, колеса для перемещения робота вдоль трубопровода следует монтировать в подпружиненном состоянии, как показано на рис. 2.

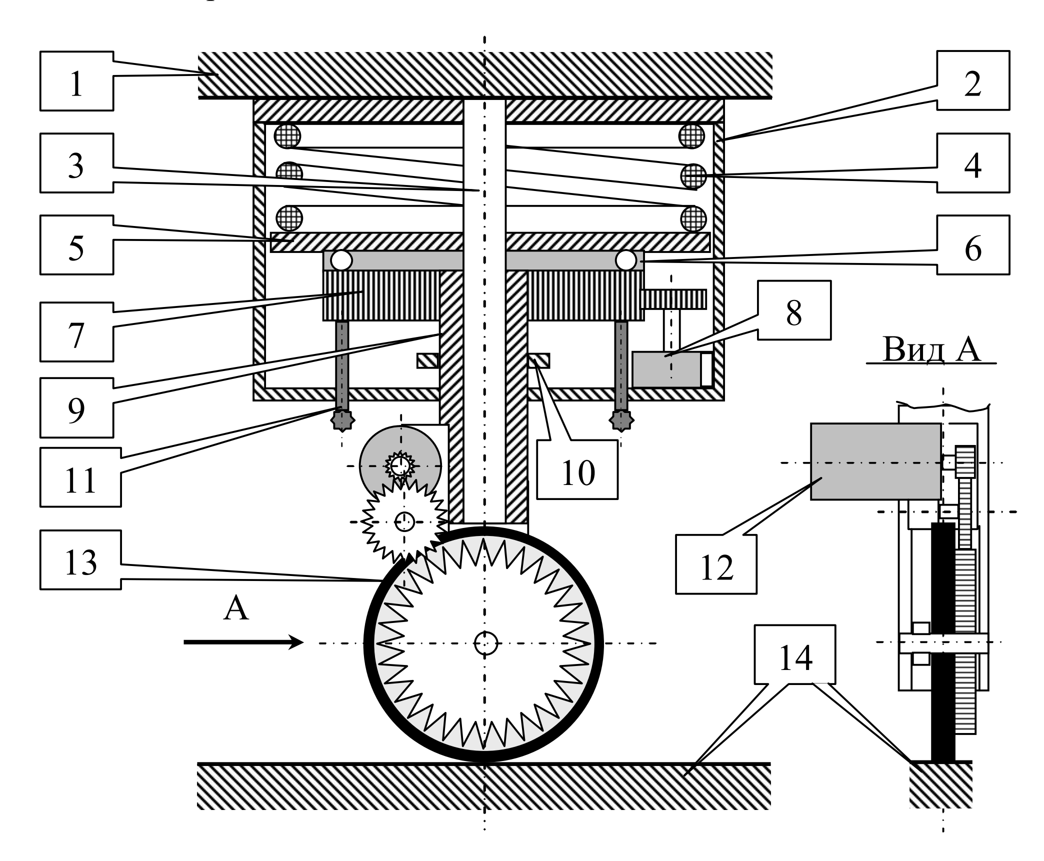


Рисунок 2 – Схема монтажа колес передвижения:
1 – рама робота; 2 – гильза; 3 – направляющий стержень; 4 – пружина;
5 – опорное кольцо; 6 – упорный подшипник; 7 – шестерня; 8 – электродвигатель;
9 – направляющая втулка; 10 – упорное кольцо; 11 – монтажные винты;
12 – электродвигатель с редуктором; 13 – колесо; 14 – трубопровод

К раме робота *1* крепятся шесть гильз *2*, внутри каждой из которых расположены: направляющий стержень *3*, пружина *4*, опорное кольцо *5*, упорный подшипник *6*, шестерня *7*, электродвигатель *8*, направляющая втулка *9*, упорное кольцо *10*, монтажные винты *11*. На направляющей втулке *9* закреплены электродвигатель с редуктором *12* и колесо *13*, при помощи которого робот транспортируется вдоль трубопровода *14*.

Монтаж колес передвижения происходит следующим образом: винтами *11* между днищем гильзы *2* и опорным кольцом *5* устанавливается пружина *4*. Жесткость пружины подбирается в соответствии с массой робота и необходимым прижимным усилием. Это позволяет прикрепить гильзы всех 6-ти колес к раме *1*, после чего монтажные винты ослабляются и робот находится на трубопроводе *14* в подпружиненном состоянии.

Оператор задает программу движения, все шесть электродвигателей с редукторами *12* вращают колеса *13*, и робот начинает движение в осевом направлении трубопровода. Для увеличения коэффициента трения между колесами и трубопроводом наружную поверхность колес следует выполнить из резины или подобного ей материала.

Смещение робота в окружном направлении происходит при повороте колес электродвигателем *8* на некоторый угол. Упорный подшипник *6* позволяет шестерне *7*, скрепленной с направляющей втулкой *9*, вращение вокруг стержня *3*. Таким образом, происходит транспортировка робота в точку исследования, которой является ось наблюдения ЭЦСИ-интерферометра. С помощью упоров *5* (рис. 1) производится жесткая фиксация робота в данном положении.

На рис. 3 показан спекл-интерферометр, оформленный в варианте «жесткой» схемы, настраиваемой при начальном монтаже и не предполагающей проведение дополнительных юстировок «на месте». Основанием интерферометра служит жесткая металлическая плита *1*, на которой фиксируются все его составляющие, а также система вдавливания индентора. Интерферометр крепится к раме робота.

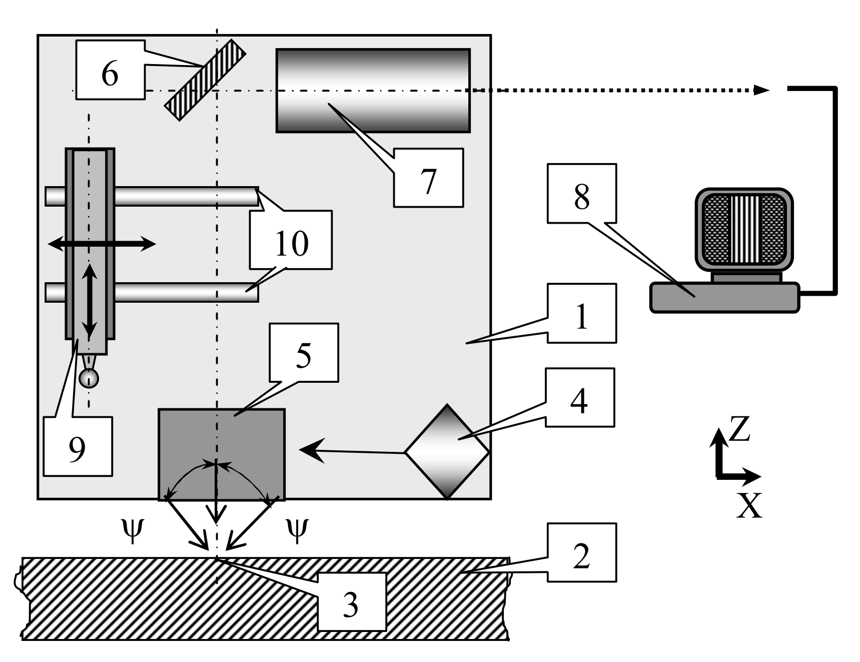


Рисунок 3 – Схема расположения функциональных элементов интерферометра на плите-основании:
1 – плита-основание; 2 – трубопровод; 3 – точка исследования; 4 – лазерный источник; 5 – уголковый отражатель; 6 – поворотное зеркало; 7 – цифровая видеокамера; 8 – компьютер оператора; 9 – индентор; 10 – направляющие

Поверхность трубопровода *2* в заданной оператором точке исследования *3* освещается когерентным лазерным источником *4*. Лазерный пучок, проходя через уголковый

отражатель *5*, расширяется и освещает исследуемую поверхность под определенным углом. Различные расположения отражательных зеркал позволяют осуществлять независимое измерение отдельных пространственных составляющих векторного поля перемещений: нормальных к поверхности объекта или тангенциальных направлениях. Для измерения нормальных перемещений принята оптическая схема спекл-интерферометра, аналогичная по виду схеме интерферометра Майкельсона, в котором отражающие зеркала заменены на диффузно-рассеивающие поверхности, одна из которой опорная, а вторая является поверхностью трубопровода. Два наложенных изображения регистрируются с помощью цифровой видеокамеры *7*, сигнал от которой передается на компьютер оператора *8*, где оцифровывается и сохраняется в виде числового файла.

Для записи спекл-полей плоскостных компонент перемещений поверхность объекта освещается под углом ψ двумя световыми пучками, симметричными относительно нормали к его поверхности. Для измерения компоненты перемещений U направляющие векторы освещающих пучков должны лежать в плоскости OXZ, а для измерения компоненты V – в плоскости OYZ.

Далее производится вдавливание индентора. Приспособление для вдавливания индентора *9*, состоящее из корпуса и поршня, передвигается по направляющим *10* до совпадения осей индентора и наблюдения. Происходит фиксация в данном положении и вдавливание шарового индентора в поверхность трубопровода. После описанной процедуры приспособление для вдавливания индентора возвращается в первоначальное положение.

Затем производится регистрация спекл-полей после вдавливания индентора и информация поступает на компьютер оператора. Разница по интенсивности двух спекл-полей, зарегистрированных в исходном и деформированном состояниях объекта исследования, представляет на мониторе компьютера систему интерференционных полос, являющихся изолиниями соответствующих перемещений. Расшифровка получаемых интерферограмм для нормальных и тангенциальных перемещений производится с помощью следующих соотношений:

$$W = \frac{\lambda N}{2},\; U(V) = \frac{\lambda N}{2\sin\psi}, \qquad (1)$$

где λ – длина волны когерентного лазерного излучения, N – интерференционный порядок полосы.

Затем упоры *5* (рис. 1) приводятся в первоначальное положение, и робот продолжает движение к следующей точке исследования.

Ранее был разработан способ крепления измерительного модуля ЭЦСИ-интерферометра на цилиндрических объектах, также основанный на принципе жесткой механической связи (рис. 4). Здесь рама *1*, две пары тяг *2* и прижимные планки *3* образуют замкнутую цепь (внутреннее усилие в которой, регулирующее усилие прижатия, определяется затяжкой установочных гаек). Фактическое опирание крепежного приспособления на поверхность объекта *4* осуществляется в шести фиксированных точках. Измерительный модуль *5* жестко крепится к раме. Созданный по указанной схеме образец данного приспособления позволяет надежно фиксировать измерительную систему на трубопроводах различного диаметра.

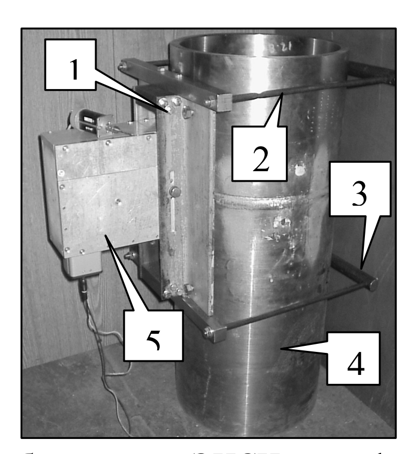


Рисунок 4 – Способ крепления ЭЦСИ-интерферометра на трубопроводе при исследовании остаточных напряжений методом сверления отверстия: 1 – жесткая рама; 2 – тяги; 3 – прижимные планки; 4 – катушка трубопровода; 5 – ЭЦСИ-интерферометр

Экспериментальная оценка чувствительности ЭЦСИ-интерферометра к деформационному отклику материала

С целью оценки чувствительности спекл-интерферометра к деформационному отклику, имеющему место в зоне индентирования, проводились исследования на стальных и дюралюминиевых пластинах в виде удлиненной полосы. Схема нагружения тестового образца изгибающим моментом, а также общий вид нагружающего устройства показаны на рис. 5. Напряжения ± σ, действующие в поверхностных слоях образца (зона индентирования), рассчитывались по величине момента известным образом.

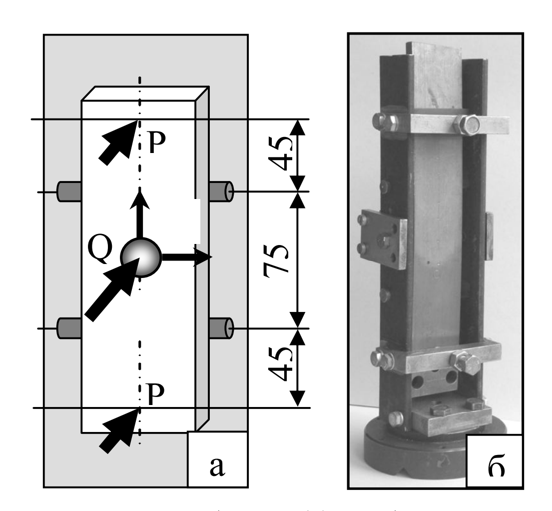


Рисунок 5 – Схема нагружения образца (а) и общий вид нагружающего устройства (б)

Регистрация остаточного деформационного отклика образца проводилась после индентирования при отсутствии в нем начальных напряжений (σ = 0). Величина усилия Q, приложенного к индентору диаметром 3 мм, на всех этапах эксперимента была одинаковой (Q = 1000 Н). Как и следовало ожидать, картина полос нормальной компоненты

вектора перемещений в этом случае имеет осесимметричный характер (рис. 6 *а*)), а центрально-симметричные интерферограммы двух тангенциальных компонент идентичны, но развернуты одна относительно другой на 90°(рис. 6 *б*), *в*)).

На следующих этапах эксперимента величина напряжений σ последовательно увеличивалась в пределах до σ = 200 МПа. Например, при заданном напряжении σ = 200 МПа (на растянутых волокнах образца) характер картин полос после индентирования полностью изменился. В частности, показанная на рис. 6 *ж*) интерферограмма нормальных перемещений имеет вид двухлепестковой розетки. Заметные изменения претерпевают также и интерферограммы тангенциальных перемещений (рис. 6 *з*), *и*)). Характерно, что на сжатых волокнах образца было отмечено существенное изменение кинетики трансформации интерферограмм (рис. 6 *г*) – *е*)).

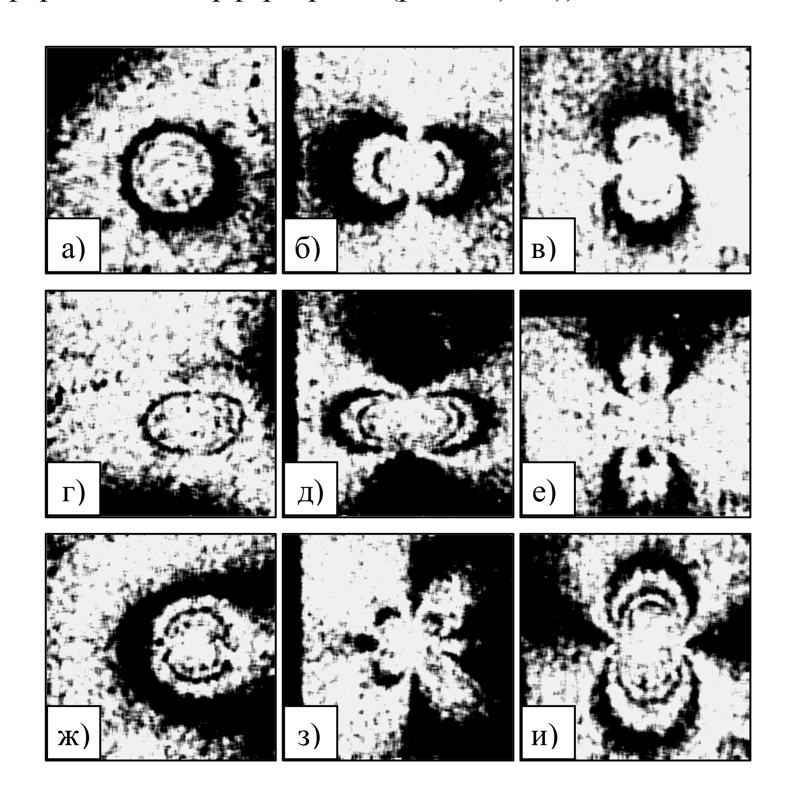


Рисунок 6 – Спекл-интерферограммы различных компонент полей вектора перемещений:
а),б),в) – W, U, V ($\sigma_1 = \sigma_2 = 0$); *г),д),е)* – W, U, V ($\sigma_1 = 0$, $\sigma_2 = -200$ МПА);
ж),з),и) – W, U, V ($\sigma_1 = 0$, $\sigma_2 = 200$ МПа)

Проведенные эксперименты наглядно демонстрируют на качественном уровне заметную чувствительность формы деформационного отклика к уровню и знаку напряжений в зоне индентирования.

Таким образом, при пошаговом движении интеллектуального робота вдоль трубопровода с последующей регистрацией методом ЭЦСИ деформационного отклика материала на вдавливание индентора можно сделать вывод о напряженном состоянии данного участка. В зонах присутствия напряжений вид интерферограмм и величины остаточных перемещений (а следовательно, и напряжений) будут сответствовать тому или иному виду напряженного состояния, полученному в тестовых экспериментах.

Выводы

Предложена концепция интеллектуального робота для исследования напряженного состояния трубопроводов, находящихся в эксплуатации. Использование в роботе ЭЦСИ-интерферометра в сочетании с методом вдавливания индентора дает возможность оперативно, наглядно и в цифровом формате получать информацию о полях перемещений вблизи локального воздействия на материал, что и будет свидетельствовать о напряженном состоянии конструкции. Применение подобного робота в промышленности может существенно повысить безопасность эксплуатации трубопроводов и будет способствовать улучшению состояния окружающей среды.

Литература

1. Биргер И.А. Остаточные напряжения / И.А. Биргер. – М. : Машгиз, 1963. – 233 с.
2. Экспериментальная механика / под ред. А. Кобаяси. – М. : Мир, 1990. – Т. 2. – 551 с.
3. Разумовский И.А. Интерференционно-оптические методы механики деформируемого твердого тела / И.А. Разумовский. – Москва : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 239 с.
4. Дайчик М.Л. Методы и средства натурной тензометрии / М.Л. Дайчик, Н.И. Пригоровский, Г.Х. Хурдушов. – М. : Машиностроение, 1989. – 236 с.
5. Александров А.Я. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого твердого тела / А.Я. Александров, М.Х. Ахметзянов. – М. : Наука, 1973. – 572 с.
6. Апальков А.А. Применение электронной спекл-интерферометрии для измерения остаточных напряжений / А.А. Апальков, И.Н. Одинцев, И.А. Разумовский // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2002. – № 4. – С. 39-41.
7. Апальков А.А. Метод измерения остаточных напряжений в массивных элементах конструкций с использованием электронной спекл-интерферометрии / А.А. Апальков, И.Н. Одинцев, И.А. Разумовский // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2003. – № 3. – С. 45-49.
8. Махутов Н.А. Исследование остоточных напряжений с применением электронной цифровой спекл-интерферометрии в натурных условиях / Н.А. Махутов, И.А. Разумовский, В.С. Косов [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2008. – № 5. – С. 47-51.
9. Бакиров М.Б. Феноменологическая методика определения механических свойств корпусных сталей ВВЭР по диаграмме вдавливания шарового индентора / М.Б. Бакиров, В.В. Потапов // Заводская лаборатория. – 2000. – № 12. – С. 35-43.
10. Апальков А.А. Применение цифровой спекл-интерферометрии для определения остаточных напряжений при вдавливании индентора / А.А. Апальков // Машиностроение и техносфера XXI века : сборник трудов XIV Международной научно-технической конференции (Севастополь, 2007). – Донецк : ДонНТУ, 2007. – Т. 1. – С. 40-43.

А. Апальков, Т. Акінфієв, М. Армада

Концепція інтелектуального робота для оцінки напруг у трубопроводах

У статті розглядається концепція створення інтелектуального робота для дослідження напруженого стану трубних конструкцій. Пропонується колісний робот, який має розбірну жорстку раму. Розглянуто механізм пересування робота вздовж трубопроводу. Для дослідження напруженого стану трубопроводу використовується метод вдавлювання кульового індентора.

A. Apal'kov, T. Akinfiev, M. Armada

A Concept of Intellectual Robot for the Studies of Stresses in Tubes

The paper is devoted to the problem of construction of robot for investigation of stresses condition in tubes. The proposed wheeled robot has a hard sectional frame. Mechanism of the robot movement along the tubes is considered. For studies of stresses situation in the tube, the robot uses a method of indentation of ball indentor.

Статья поступила в редакцию 26.06.2009.